

# Estado del arte de los sistemas de navegación en cirugía hepática

S. Díaz Rodríguez<sup>1</sup>, P. Sánchez-González<sup>1,2</sup>, I. Oropesa García<sup>1,2</sup>, P. Lamata de la Orden<sup>1</sup>,  
E.J. Gómez Aguilera<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Grupo de Bioingeniería y Telemedicina, ETSI Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España;  
{sdiaz,psanchez,iropesa,egomez}@gbt.tfo.upm.es

<sup>2</sup> Centro de Investigación Biomédica en Red en Bioingeniería, Biomateriales y Nanomedicina, Madrid, España

## Resumen

*Los avances en instrumentación, tecnologías de localización y en técnicas de procesamiento de imagen han permitido el desarrollo de la cirugía guiada por imagen (CGI). En concreto, los sistemas de navegación quirúrgicos permiten transferir los estudios preoperatorios, imágenes y decisiones al propio quirófano, sirviendo de apoyo a los cirujanos durante la intervención. Los principales retos de estos sistemas se hallan en su incorporación en cirugías de tejidos blandos, donde la deformación y el movimiento de los órganos complican el desarrollo de estos sistemas. Tal es el caso de las cirugías hepáticas. El presente trabajo recoge un estado del arte de sistemas de navegación centrados en cirugía hepática.*

## 1. Introducción

La cirugía de mínima invasión (CMI) se encuentra hoy en día consolidada en la rutina clínica gracias a los múltiples beneficios que aporta al paciente [1]. Sin embargo, esta técnica ofrece un cambio de paradigma respecto a la cirugía convencional que resulta en ciertas limitaciones para el cirujano, tales como la falta de percepción táctil, la dificultad de coordinación de movimientos (ojo - mano) y la ausencia de sensación de profundidad originada por la visión monoscópica del vídeo endoscópico [1]. Además en las cirugías de tejidos blandos se añade la dificultad de las deformaciones y movimientos de los tejidos, causados principalmente por la manipulación de los tejidos por parte del cirujano, y en un segundo lugar por el neumoperitoneo, la respiración del paciente o el latido del corazón [2].

La planificación preoperatoria es una etapa clave del proceso quirúrgico donde el cirujano localiza las lesiones a intervenir y sus estructuras adyacentes. De este modo, decide el camino óptimo hasta el objetivo evitando las zonas de riesgo. Tradicionalmente, esta tarea se realiza mediante la observación de los estudios preoperatorios realizados al paciente (Tomografía Computerizada-TC o Resonancia Magnética -RM). Actualmente, los sistemas de planificación permiten una visualización más intuitiva de las estructuras del paciente mediante reconstrucciones tridimensionales, y el cálculo de parámetros cuantitativos de interés tales como la distancia entre el tumor y las estructuras críticas adyacentes [3].

Esta información preoperatoria se incorpora en los sistemas de navegación quirúrgica con el fin de guiar al cirujano durante la intervención, mostrando en tiempo real información de utilidad para la cirugía. En cirugías de tejidos blandos dicha información pierde vigencia debido

a los cambios en la anatomía del paciente [2]. Para paliar este problema, los sistemas de navegación incorporan tecnologías y métodos para capturar la anatomía intraoperatoria y ponerla en correspondencia con la preoperatoria. Además, pueden incorporar equipos que permitan el seguimiento del instrumental y herramientas de visualización que de forma intuitiva puedan ser empleadas por los cirujanos.

Entre las cirugías de tejidos blandos, destacan las intervenciones centradas en el hígado, teniendo especial relevancia las resecciones hepáticas [4]. Este tipo de técnica quirúrgica se considera especialmente compleja por el alto riesgo de causar una hemorragia grave al paciente [5] (el hígado posee una estructura vascular especialmente poblada). Este hecho, junto al de no dejar enfermedad residual en la resección, obliga al cirujano a conocer de forma precisa la anatomía hepática del paciente y la posición de los tumores a extirpar. Los sistemas de navegación pueden llegar a jugar un papel importante en estas técnicas, al poder adaptar la situación preoperatoria a la intraoperatoria, mostrando la posición del instrumental respecto al plano de resección previamente planificado.

Este artículo recoge el estado del arte de los sistemas de navegación orientados a cirugía hepática. Para ello, se ha realizado una búsqueda sistemática a través del Google Académico, que referencia trabajos de investigación presentes en bases de datos como PubMed o IEEEExplore. Se ha partido de una búsqueda general mediante palabras clave como “*surgical navigation*”, “*image guided surgery*”, “*augmented reality*” añadiendo términos concretos como “*soft tissue*”, “*laparoscopy*”, “*liver*” o “*hepatic resection*”. Posteriormente, se han analizado las bibliografías de los artículos obtenidos en busca de nuevas referencias. Sólo se han seleccionado aquellos trabajos que presentan una descripción precisa de los métodos y resultados obtenidos.

## 2. Navegadores quirúrgicos hepáticos

La construcción de un sistema de navegación quirúrgico implica la fusión de múltiples componentes. En este apartado se recogen los principales sistemas, así como las diferentes metodologías empleadas en los prototipos estudiados. Se diferencia entre los que se aplican en cirugías abiertas, y los que se emplean en abordajes de mínima invasión. La tabla 1 recoge los principales resultados del estudio llevado a cabo en este trabajo.

Cirugía	Caso clínico	Artículo	Información preoperatoria	Información intraoperatoria	Tracking	Registro	Visualización
Abierta	Resección	Cash et al. (2007) [8]	TC o RM	Escáner láser	Óptico	Método ICP y marcadores	Modelo virtual y estudio
	Resección	Beller et al. (2007) [6]	No se utiliza	US	Óptico	No se realiza	US aumentado
	RFA	Maeda et al. (2009) [7]	RM	RM abierta y US	Óptico	Marcadores	RM aumentada
	Resección	Oldhafer et al. (2009) [9]	TC o RM	US	Óptico	Marcadores y US	Modelo virtual y US
	Resección y RFA	Vom. Berg et al. (2010) [10]	No se especifica	US	Óptico	Marcadores y US	Modelo virtual y US
CMI	Resección	Scheuering et al. (2003) [18]	TC con contraste	No se utiliza	No se realiza	Magnético y marcadores	Vídeo aumentado
	RFA	Krücken et al. (2005) [12]	TC	LUS	Magnético	Marcadores anatómicos	US aumentado con TC
	RFA	Bao et al. (2007) [11]	No se utiliza	LUS	Óptico	No se realiza	US aumentado
	Resección	Konishi et al. (2007) [14]	TC	LUS	Óptico - magnético	Marcadores	Vídeo aumentado y modelo virtual
	Resección	Feuerstein et al. (2008) [16]	TC con contraste	Brazo en C	Óptico móvil	Marcadores	Vídeo aumentado
	Resección	Hansen et al. (2008) [15]	TC con contraste o RM	LUS	Magnético	LUS	LUS y modelo virtual
	Resección	Lamata et al. (2008) [21]	TC con contraste	No se utiliza	No se utiliza	No se realiza	Modelo virtual
	Laparoscopia	Megali et al. (2008) [19]	TC con contraste	US	Óptico - magnético	Rígido	RA, estudio y modelo virtual
	Resección	Kleemann et al. (2008) [13]	TC o RM	LUS	Magnético	Marcadores	Modelo virtual, LUS y vídeo
	Laparoscopia	Matsuoka et al. (2010) [17]	RM	RM abierta	Bobina RF	Compensación respiración	Modelo virtual, IRM y vídeo
	Laparoscopia	Sugimoto et al. (2010) [20]	TC	No se utiliza	No se realiza	Marcadores anatómicos	RA, modelo virtual y vídeo

**Tabla 1.** Comparativa entre los prototipos de navegación en cirugía hepática

## 2.1. Cirugía abierta

En cirugía hepática abierta, los principales casos de aplicación de los sistemas de navegación propuestos en la literatura se centran en resecciones hepáticas y/o ablaciones por radiofrecuencia (RFA).

La información preoperatoria es un elemento que no todos los autores deciden incorporar en sus navegadores. Algunos prefieren representar la navegación sobre la información intraoperatoria, y de este modo asegurar la reproducción exacta de la situación del quirófano [6]. En cambio, los que sí que utilizan dicha información se basan en estudios de TC o RM principalmente [2].

Una vez en el quirófano, la mayoría emplea como fuente de imagen intraoperatoria equipos de US por su capacidad de mostrar la vascularización del hígado en tiempo real [6]. Otros complementan esta información con equipos de RM abierta [7], o con escáneres láser que digitalizan puntos del hígado con el objetivo de obtener la superficie de éste en el quirófano [8].

La tecnología de seguimiento más común es la óptica, empleada para obtener la localización tanto del instrumental quirúrgico como de la sonda del US a través de marcadores pasivos colocados en éstos [9].

El registro entre la información pre e intraoperatoria se realiza, en la mayoría de los casos, a través de marcadores autoadhesivos (de 4 a 8) [7] colocados sobre la piel del paciente. Éstos se sitúan tanto en el momento de la adquisición del estudio preoperatorio como en el quirófano. En algunos casos, los autores se decantan, para

llevar a cabo el registro, por el empleo de imágenes médicas para la localización de los principales vasos hepáticos [8]-[10].

En todos los casos analizados, los resultados obtenidos se presentan al cirujano mediante un monitor con el que se puede interaccionar a través de un ratón convencional, un *spaceball* con 6 grados de libertad [9] o una pantalla táctil [9]. En cuanto a la forma de visualización, algunos se decantan por representar la navegación sobre el estudio preoperatorio [8], el modelo virtual [9][10], la imagen de US [6] o la imagen de RM aumentada con el modelo virtual [7].

## 2.2. Cirugía de mínima invasión

En CMI hepática, los sistemas de navegación propuestos abordan el caso clínico de la resección hepática y la RFA, extendiéndose en algunos casos su uso a la cirugía laparoscópica en general.

Todos los prototipos, salvo el expuesto en [11], incorporan la información preoperatoria proveniente del TC o la RM. En estos sistemas, es usual adquirir el estudio de TC con contraste para facilitar la construcción de los modelos virtuales de la vascularización del paciente.

Como fuente de información intraoperatoria, gran parte de los sistemas analizados adquieren imágenes de LUS [11]-[15]. Otros autores se decantan por utilizar un brazo en C [16] y así obtener información de TC sobre la deformación del hígado tras la aplicación del neumoperitoneo. Además, también se usa RM

intraoperatoria con una doble función [17]: tomar imágenes de mayor calidad respecto a las dadas por el LUS y realizar el seguimiento del instrumental al colocar una bobina de RF sobre el endoscopio.

A diferencia de los prototipos de cirugía abierta, sólo dos emplean sistemas basados en tecnología óptica para realizar el seguimiento de los objetos del escenario quirúrgico. Así, se utilizan para localizar tanto la sonda del LUS como la aguja de ablación [11], o para detectar tanto el instrumental como el brazo en C (diseñando sistemas propios con cuatro cámaras ópticas móviles, como en el caso de [16]). La mayoría de los equipos analizados emplean la tecnología magnética [13]. A diferencia de la tecnología óptica, estos dispositivos permiten el seguimiento del instrumental en el interior del cuerpo y poseen una buena precisión en el rango de 0.6 a 1.4 mm en cuanto a posición y de 0.4 a 0.8 grados en orientación [2]. Con el objetivo de aprovechar las ventajas que ofrece cada una de las tecnologías de tracking, algunos optan por utilizar una combinación óptica-magnética, localizándose la posición de los instrumentos rígidos mediante el dispositivo óptico y la de los flexibles mediante el magnético [14].

En los casos en los que se realiza el registro, los métodos empleados son variados. Vuelve a ser común utilizar marcadores autoadhesivos tanto sobre la piel del paciente como la superficie del órgano [16]. Para detectar la posición del marcador en el quirófano, algunos autores utilizan nuevamente un dispositivo de seguimiento [18]. Para mejorar la precisión, en ocasiones, dichos marcadores se complementan con marcas anatómicas como las lesiones internas [13]. Una vez obtenida la localización de los marcadores en la fase pre e intraoperatoria, se alinean mediante software específico [18]. En algunos prototipos, el registro se realiza de forma no invasiva proyectando el estudio del paciente sobre el cuerpo de éste y realizando la alineación mediante marcas naturales como el ombligo [19]. En todos los casos anteriores, el registro se realiza únicamente al comienzo de la intervención; sin embargo, otros incorporan en el navegador un módulo de registro más complejo, capaz de realizar la compensación del movimiento producido por la respiración del paciente, a través de un indicador de desplazamiento óptico [17].

La visualización del sistema se realiza comúnmente a través de una pantalla y en algunos casos también mediante sistemas de realidad aumentada (RA) sobre el cuerpo del paciente [18][19]. La interacción se produce a través de un ratón convencional, una pantalla táctil [13] o incluso a distancia mediante el mando de la Wii (Nintendo) [15]. La forma de representar la información es variada aunque cobran importancia los sistemas de RA: piel aumentada (para inserción de trócares) [20], US aumentado [11][12] o vídeo endoscópico aumentado con los modelos virtuales de las estructuras más importantes (tumores y vasos) [14]. En otras ocasiones se presenta la navegación sobre el estudio obtenido y los modelos virtuales. Por otra parte, todos los prototipos permiten la interacción con los modelos a través de funciones como el zoom, la rotación o el desplazamiento. Algunos autores

permiten la modificación intraoperatoria del plano de resección [15] o la representación de las estructuras hepáticas correspondientes únicamente a la zona por donde se está llevando a cabo la resección [21].

### 3. Discusión

En el presente trabajo se ha llevado a cabo un estudio del estado del arte de sistemas de navegación quirúrgicos centrados en cirugías hepáticas. Se ha diferenciado los casos de cirugía abierta y CMI, por sus claras diferencias metodológicas.

La construcción de estos prototipos requiere la incorporación de nuevos equipos (sistemas de tracking, equipos de imagen, etc.) en el quirófano, que modifican el flujo de trabajo del cirujano. Así, tanto los sistemas de seguimiento como la colocación de las pantallas pueden modificar fuertemente la ergonomía del cirujano a lo largo de la intervención. Por otra parte hay que considerar la puesta a punto necesaria de estos sistemas, que puede llegar a oscilar entre los 2 y los 15 minutos [10][19].

Por otro lado, las tecnologías empleadas para el seguimiento del instrumental tienen sus desventajas: la óptica reduce el movimiento del cirujano y su aplicación en CMI es limitada, al ser necesaria una línea de visión directa entre la cámara y el sensor. Los sensores basados en tecnología electromagnética son especialmente vulnerables a los materiales ferromagnéticos del medio, por ello algunos autores incluyen en sus prototipos un módulo de corrección de la distorsión magnética que ofrece buenos resultados [14].

Como alternativa a estas soluciones, un navegador hepático puede consistir en una simple visualización intuitiva de la cartografía del plano de resección, donde es el cirujano el que mentalmente encuentra correspondencias entre la anatomía real y virtual del paciente [21]. Por otro lado, algunos investigadores fomentan la explotación del vídeo endoscópico con el fin de obtener toda la información relevante del escenario quirúrgico (tejidos, instrumental, etc.) [22]. Con ello, se elimina la necesidad de incorporar nuevos elementos en el quirófano, simplificando los flujos de trabajo de los cirujanos.

El estado de implantación de estos sistemas de navegación es escaso: todos los prototipos estudiados han sido validados en modelos de laboratorio [11][12], modelos porcinos [18] y en muy pocos casos en ensayos clínicos con pacientes [6, 21]. En estos estudios se concluye que estos sistemas mejoran la orientación y la confianza del cirujano en el quirófano [21], al permitirle ver estructuras que no sería posible ver [7]. En cuanto al beneficio para el paciente, se concluye que estos sistemas ayudan a respetar los márgenes del tumor [8], dejando libre al paciente de enfermedad residual.

### 4. Conclusiones

Los sistemas de navegación quirúrgica permiten guiar al cirujano durante la intervención, mejorando su orientación y precisión. Dadas las múltiples ventajas de su uso, estos sistemas se introducen en los quirófanos con el



objetivo de mejorar la seguridad del paciente. Estos equipos se emplean asiduamente en rutina clínica en disciplinas como la neurocirugía [2]. En cirugías de tejidos blandos, donde las complicaciones son mayores debidas a los desplazamientos y deformaciones de las estructuras anatómicas, todavía se está investigando cómo construir estos sistemas de tal forma que ofrezcan resultados fiables. Para ello, es necesario lograr cuantificar de forma precisa la deformación y el movimiento de los tejidos y estructuras críticas durante la intervención. Sólo así podrán introducirse estos sistemas en la práctica clínica diaria, aportando los mismos beneficios ya demostrados en la cirugía de tejidos rígidos.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto intramural THEMIS del CIBER-BBN.

## Referencias

- [1] Cuschieri A. Laparoscopic surgery; current status, issues and futures developments. *The Surgeon*, vol 3, no 3, 2005, pp 125-138.
- [2] Baumhauer M, Feuerstein M, Meinzer H, Rassweiler J. Navigation in endoscopic soft tissue surgery: perspectives and limitations. *Journal of Endourology*, vol 22, no 4, 2008, pp 1-16.
- [3] Meinzer HP, Thorn M, Cárdenas CE. Computer planning of liver surgery – an overview. *Computers & Graphics*, vol 26, no 4, 2002, pp 569-576.
- [4] Casanova D, Figueras J, Pardo F. Cirugía hepática. Guías clínicas de la AEC, vol 7, 2004, pp 26-43.
- [5] Townsend CM, Beauchamp RD, Evers BM, Mattox KL. Sabiston Tratado de Cirugía, Fundamentos biológicos de la práctica moderna. Cap 52. Elsevier, 2009. (ISBN: 9788480863711)
- [6] Beller S, Hünerbein M, Eulenstein S, Lange T, Schlag P.M. Feasibility of navigated resection of liver tumors using multiplanar visualization of intraoperative 3-dimensional ultrasound data. *Annals of Surgery*, vol 246, no 2, 2007, pp 288-294.
- [7] Maeda T, Hong J, Konishi k, Nakatsuji T, Yasunaga T, Yamashita Y.-I, Taketomi A, Kotoh, Enjoji M, Nakashima H, Tanoue K, Maehara Y, Hashizume M. Tumor ablation therapy of liver cancers with an open magnetic resonance imaging-based navigation system. *Surgical Endoscopy*, vol 23, no 5, 2009, pp 1048-1053.
- [8] Cash M, Miga M.I, Glasgow S.C, Dawant B.M, Clements L.W, Cao Z., Galloway R.L., Chapman W.C. Concepts and preliminary data toward the realization of image-guided liver surgery. *Journal of Gastrointestinal Surgery*, vol 11, no 7, 2007, pp 844-859.
- [9] Oldhafer KJ, Stavrou GA, Prause G, Peitgen HO, Lueth T.C, Weber S. How to operate a liver tumor you cannot see. *Langenbeck's Archives of Surgery*, vol. 394(3), 2009, pp 489-494.
- [10] Vom Berg A, Candinas D, Inderbitzin D, Peterhans M, Weber S, Nolte L. Integration of computer assisted surgery and intraoperative navigation in complex liver surgery and tumorablation: First results after treatment of 10 patients. *International Journal of CARS*, vol.5(1), 2010, pp. 117-121.
- [11] Bao P, Sinha T.K, Chen C.C, Warmath J.R., Galloway R.L, Herline A.J. A prototype ultrasound-guided laparoscopic radiofrequency ablation system. *Surgical Endoscopy*, vol 21, n. 1, 2007, pp 74-79.
- [12] Krücker J, Viswanathan A, Borgert J, Glossop N, Yanga Y, Wood B.J. An electro-magnetically tracked laparoscopic ultrasound for multi-modality minimally invasive surgery. *CARS*, vol 1281, 2005, pp. 746-751.
- [13] Kleemann M, Schlichting S, Besirevic A, Hildebrand P, Hansen C, Roblick U, Martens V, Schweikart A, Peitgen H.-O, Bruch H.-P. Intraoperative update of pre operative planning data in liver surgery—an animal approach. *International Journal of CARS*, vol 3, 2008, pp 599-604.
- [14] Konishi K, Nakamoto M, Kakeji Y, Tanoue K, Kawanaka H, Yamaguchi S, Ieiri S, Sato Y, Maehara Y, Tamura S. A real-time navigation system for laparoscopic surgery based on three-dimensional ultrasound using magneto-optic hybrid tracking configuration. *International Journal of CARS*, vol 2, no 1, 2007, pp 1-10.
- [15] Hansen C, Köhn A, Schlichting S, Weiler F, Zidowitz S, Kleemann M, Peitgen H.-O. Intraoperative modification of resection plans for liver surgery *International Journal of CARS*, vol 3, no 3, 2008, pp 291-297.
- [16] Feuerstein M, Mussack T, Heining S.M., Navab N. Intraoperative laparoscope augmentation for port placement and resection planning in minimally invasive liver resection. *IEEE Transactions of Medical Imaging*, vol 27, no 3, 2008, pp 355-369.
- [17] Matsuoka Y, Kumamoto E., Sugimoto M, Azuma T, Kuroda K. Integrated MR-laparoscopy system with respiratory synchronization for minimally invasive liver surgery. *Journal of Hepatobiliary Pancreatic Sciences*, vol 17, no 5, 2010, pp 622-628.
- [18] Scheuering M, Schenk A, Schneider A, Preim B, Greiner G. Intraoperative Augmented Reality for Minimally Invasive Liver Interventions. *Proceedings of SPIE*, vol 5029, 2003, pp 407-417.
- [19] Megali G, Ferrari V, Freschi C, Morabito B, Cavallo F, Turini G, Troia E, Cappelli C, Pietrabissa A, Tonet O, Cuchieri A, Dario P, Mosca F. EndoCAS navigator platform: a common platform for computer and robotic assistance in minimally invasive surgery. *International Journal of Medical Robotics*, vol 4, no 3, 2008, pp 242-251.
- [20] Sugimoto M, Yasuda H, Koda K, Suzuki M, Yamazaki M, Tezuka T, Kosugi C, Higuchi R, Watavo Y, Yagawa Y, Uemura S, Tsuchiya S., Azuma T. Image overlay navigation by markerless surface registration in gastrointestinal, hepatobiliary and pancreatic surgery. *Journal of Hepatobiliary Pancreatic Sciences*, vol 17, no 5, 2010, pp. 629-636.
- [21] Lamata P, Lamata F, Sojar V, Makowski P, Massoptier L, Casciaro S, Ali W, Stüdeli T, Declerck J, Elle OJ, Edwin B. Use of the Resection Map system as guidance during hepatectomy. *Surg Endosc.* vol. 24(9), 2010, pp. 2327-37.
- [22] Sánchez-González P, Cano AM, Oropesa I, Sánchez-Margallo FM, del Pozo F, Lamata P, Gómez EJ. Laparoscopic Video Analysis for Training and Image Guided Surgery. *Minimally Invasive Therapy & Allied Technologies (in press)*, 2011.